



Europäisches Patentamt

Europ an Patent Office

Office européen des brevets



⑪ Numéro de publication : **0 557 186 A1**

⑫

DEMANDE DE BREVET EUROPEEN

⑳ Numéro de dépôt : **93400392.2**

⑤① Int. Cl.⁵ : **H01L 31/0352**

㉔ Date de dépôt : **17.02.93**

③① Priorité : **18.02.92 FR 9201826**

④③ Date de publication de la demande :
25.08.93 Bulletin 93/34

⑧④ Etats contractants désignés :
DE FR GB

⑦① Demandeur : **FRANCE TELECOM**
6, Place d'Alleray
F-75015 Paris (FR)

⑦② Inventeur : **Deveaud-Pledran, Benoît**
29, rue des Templier, Brelevenez
F-22300 Lannion (FR)
Inventeur : **Gerard, Jean-Michel**
10, Square Adanson
F-75005 Paris (FR)

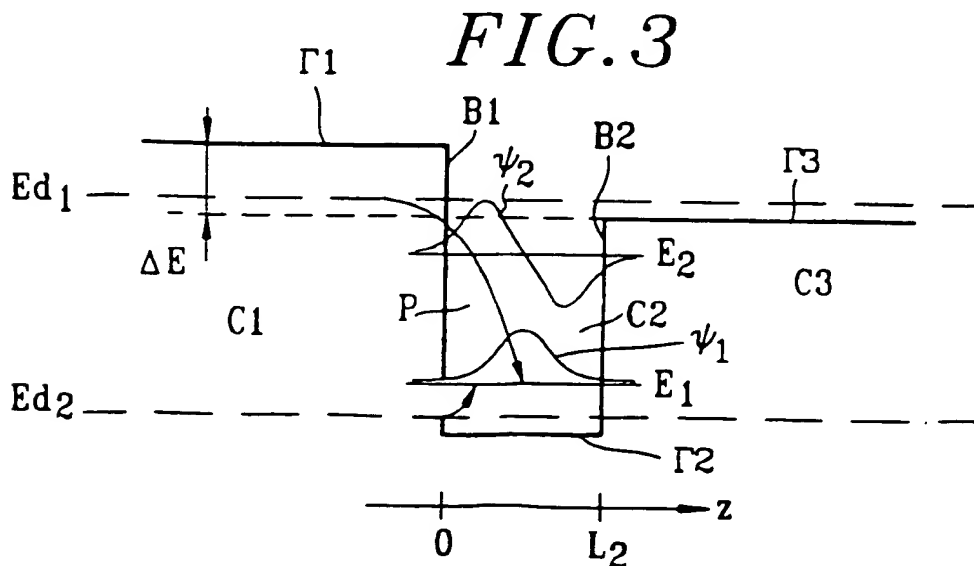
⑦④ Mandataire : **Martin, Jean-Jacques et al**
Cabinet REGIMBEAU 26, Avenue Kléber
F-75116 Paris (FR)

⑤④ Détecteur photoélectrique à puits quantiques à sensibilité améliorée.

⑤⑦ Détecteur photoélectrique présentant une structure à puits quantiques multiples constitués chacun par une barrière amont (B1) réalisée en un premier matériau semiconducteur, un puits (P) réalisé en un deuxième matériau semiconducteur, et une barrière aval (B2) réalisée en un troisième matériau semiconducteur, chaque matériau semiconducteur étant défini par sa composition chimique, et la conductibilité électrique dans le détecteur étant assurée par propagation de porteurs de charge donnée dans une bande électronique de type donné présentant, dans chacun desdits matériaux, un extremum d'énergie.

Selon l'invention, lesdits matériaux semiconducteurs étant au moins partiellement dopés en donneurs, les premier et troisième matériaux semiconducteurs ont une composition chimique telle que la différence (E) d'énergie, entre l'extremum d'énergie de ladite bande électronique dans le premier matériau semiconducteur et l'extremum d'énergie de ladite bande électronique dans le troisième matériau semiconducteur est supérieure en valeur absolue à l'énergie maximale des phonons longitudinaux optiques dans le deuxième matériau semiconducteur constituant le puits (P).

Application aux détecteurs infrarouge, notamment dans la gamme 2×10^{13} - 4×10^{13} Hz.



EP 0 557 186 A1

La présente invention concerne un détecteur photoélectrique du type présentant une structure à puits quantiques multiples.

L'invention trouve une application particulièrement avantageuse dans le domaine des détecteurs infrarouge, notamment dans la gamme de fréquences 2×10^{13} - 4×10^{13} Hz.

Jusqu'à un passé très récent, les détecteurs dans la gamme 2×10^{13} - 4×10^{13} Hz étaient réalisés avec des matériaux constitués par des éléments des colonnes II et VI de la classification de Mendeleiev, principalement HgCdTe. Ces matériaux présentant une bande interdite de la largeur requise (entre 100 et 200 meV), ils possèdent une détectivité remarquable. Leur principal défaut réside dans la difficulté de réaliser des jonctions p-n ou des contacts de bonne qualité. C'est cette difficulté qui a limité l'expansion de dispositifs basés sur la détection à base de matériaux II-VI. En particulier, on ne sait pas encore réaliser de façon fiable des matrices de photodétecteurs de dimension suffisante.

Au début des années 80, il a été proposé d'utiliser pour détecter dans la gamme 2×10^{13} - 4×10^{13} Hz, non plus des transitions bande à bande, mais des transitions intersousbande dans un puits quantique. Ce type de détecteur photoélectrique présente, de façon très générale, une structure à puits quantique constitué par une barrière amont réalisée en un premier matériau semiconducteur, un puits réalisé en un deuxième matériau semiconducteur, et une barrière aval réalisée en un troisième matériau semiconducteur, chaque matériau semiconducteur étant défini par sa composition chimique, et la conductibilité électrique dans le détecteur étant assurée par propagation, dans le sens allant de la barrière amont à la barrière aval, de porteurs de charge donnée dans une bande électronique de type donné présentant, dans chacun desdits matériaux, un extremum d'énergie.

De façon pratique, les détecteurs photoélectriques à puits quantiques sont généralement réalisés par épitaxies successives sur un substrat de différentes couches desdits matériaux semiconducteurs.

Dans un puits quantique, le confinement des porteurs dans la direction de croissance épitaxiale provoque la formation de niveaux d'énergie quantifiés. Par exemple, pour une largeur de puits de l'ordre de 5 nm dans un système où les premier et troisième matériaux sont constitués par du $\text{Ga}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{As}$ et le deuxième matériau du GaAs, on obtient une séparation entre les deux premiers niveaux qui correspond à la longueur d'onde recherchée. Pour le système précité, les porteurs sont des électrons et ladite bande électronique la bande de conduction. Si l'on dope le puits avec des donneurs, on obtient alors une population d'électrons sur le niveau fondamental du puits, et le système peut absorber pourvu que la lumière incidente soit polarisée correctement ; lorsque les porteurs sont des électrons, les transitions ne sont autorisées que si la polarisation a une composante parallèle à la direction de croissance des couches.

Le principe de base du détecteur photoélectrique à puits quantiques ainsi énoncé a été par la suite amélioré par de nombreuses modifications. Par exemple, les transitions ne se font pas en fait entre deux niveaux quantifiés dans le puits, mais entre un niveau confiné et une minibande de niveaux au-dessus des barrières. De cette façon, les électrons photoexcités ont une probabilité plus importante de participer au photocourant.

Il a été également proposé par B.F. Levine et al (Appl. Phys. Lett. 57(4), 1990, pp 383-385) d'introduire entre les deux barrières du puits une dissymétrie limitée de façon à obtenir un détecteur accordable sur une certaine plage de longueur d'onde.

Une autre amélioration consiste à graver sur le contact supérieur du photodétecteur un réseau de période telle que, compte tenu des règles de sélection, la lumière incidente se couple de façon plus efficace avec le puits quantique multiple.

On peut de cette façon, en bénéficiant des facilités offertes par la maturité des processus technologiques sur les matériaux à base de GaAs par exemple, réaliser sans trop de difficultés des matrices de photodétecteurs 256×256 . La démonstration de ce type de matrices a été effectuée à la température de 60 K. Elle permet une résolution thermique de l'image de l'ordre de 0,1 K. Ceci constitue déjà un progrès important par rapport aux systèmes concurrents.

Cependant, pour réaliser des détecteurs photoélectriques facilement utilisables, il est nécessaire d'élever autant que possible la température de fonctionnement.

Pour parvenir à un tel objectif, il convient d'améliorer la détectivité des détecteurs à puits quantiques. Différents paramètres affectent cette détectivité, en particulier la valeur du coefficient d'absorption intersousbande. Différentes techniques ont été proposées pour améliorer ce coefficient d'absorption, par exemple en entourant le puits par des barrières fines de composition différente de la composition des barrières principales. Mais, en général, ce qui est gagné d'un côté est perdu d'un autre côté. Dans le cas de l'exemple précédent, si l'on gagne en absorption, on perd en coefficient de transfert des électrons vers la barrière.

Une des limitations fondamentales du rendement des détecteurs à puits quantiques connus réside dans le temps de capture dans le puits d'un électron photoexcité dans la minibande du détecteur. En effet, on peut écrire d'une manière très simplifiée la responsivité R de ce type de structure comme le produit du coefficient d'absorption α par la probabilité pour un électron de rejoindre le contact sans être repiéagé dans un puits. Si

l'on appelle τ_{capt} le temps moyen de capture, et τ_{drift} le temps que met un électron à traverser la structure, on obtient :

$$R \propto a \cdot \tau_{\text{capt}} / \tau_{\text{drift}} \quad (1)$$

On notera g , coefficient de gain, le rapport $\tau_{\text{capt}} / \tau_{\text{drift}}$. Ceci signifie que, si le temps de capture moyen est plus long que le temps de déplacement d'un contact à l'autre, le détecteur présentera du gain. La détectivité du photodétecteur dépend non seulement de R , mais aussi de la contribution du bruit i du courant d'obscurité du dispositif. L'expérience montre que i est un bruit de grenaille à une très bonne approximation ; si I_d est le courant d'obscurité, on a :

$$i \propto \sqrt{I_d \cdot g}$$

et

$$D \propto R/i \propto a \sqrt{g} / \sqrt{I_d}$$

La Demanderesse a analysé en détail et mesuré par des expériences de luminescence résolue dans le temps avec une précision temporelle meilleure que la picoseconde, les processus de capture d'un électron dans un puits quantique. Les résultats de ces investigations ont montré que le temps de capture dans une structure classique est toujours extrêmement court, de l'ordre de la picoseconde ou moins. Le temps de transit d'un électron dans la structure est quant à lui plutôt de l'ordre de 10 ps. Il en résulte une limitation des performances des détecteurs à puits quantiques actuellement connus.

Aussi, la présente invention a pour but de proposer un détecteur photoélectrique présentant une structure à puits quantiques multiples dont la détectivité serait améliorée par une modification de la structure qui augmenterait le temps de capture des porteurs photocréés.

Selon la présente invention, un détecteur photoélectrique présentant la structure générale à puits quantique précitée est remarquable en ce que, lesdits matériaux semiconducteurs étant au moins partiellement dopés en porteurs, les premier et troisième matériaux semiconducteurs ont une composition chimique telle que la différence d'énergie, au niveau desdites barrières, entre l'extremum d'énergie de ladite bande électronique dans le premier matériau semiconducteur et l'extremum d'énergie de ladite bande électronique dans le troisième matériau semiconducteur, est supérieure en valeur absolue à l'énergie maximale des phonons longitudinaux optiques dans le matériau semiconducteur constituant un puits. Selon l'invention, la structure est formée d'un empilement alterné de couches du deuxième matériau semiconducteur séparées par des couches d'un matériau semiconducteur présentant, de la barrière aval d'un puits à la barrière amont du puits suivant dans le sens de propagation des porteurs, une composition chimique variant graduellement de la composition du troisième matériau semiconducteur à celle du premier matériau semiconducteur.

Ainsi, au lieu de présenter des barrières de composition identique, ou quasi identique, comme dans les détecteurs à puits quantiques connus, la composition des barrières du photodétecteur conforme à l'invention varie de manière que l'énergie des niveaux d'un côté du puits soit supérieure de plus de 50 meV, par exemple pour le système GaAlAs/GaAs, à l'énergie des électrons de l'autre côté. De cette façon, lorsque l'on place le détecteur photoélectrique de l'invention sous champ électrique, comme c'est le cas en fonctionnement, les porteurs qui arrivent au bord d'un puits subissent deux effets qui limitent la probabilité de capture des porteurs :

- leur vitesse est augmentée du fait de leur plus grande énergie cinétique, acquise au passage de la discontinuité,
- leur probabilité de capture par émission d'un phonon optique est diminuée puisque même après émission de ce type de phonon, le porteur sera encore dans les états de la minibande. La largeur du puits étant assez faible, on s'affranchit pratiquement des problèmes d'ionisation par impact.

Des expériences de luminescence en continu et avec une résolution picoseconde ont permis de montrer l'efficacité de ce type de structure dans la réduction du taux de capture dans un puits quantique. Selon l'équation (1), le rendement en est augmenté d'autant.

Dans les structures à puits quantiques mettant en oeuvre des matériaux semiconducteurs répondant à la formule chimique générale $Ga_xAl_{1-x}As$, les porteurs sont, de préférence, des électrons de la bande de conduction. Dans ce cas, le signe des porteurs étant négatif, l'extremum d'énergie de la bande de conduction dans la barrière aval est inférieur à l'extremum d'énergie de la bande de conduction dans la barrière amont.

Il convient de signaler toutefois que l'invention présente l'avantage important de permettre la réalisation de détecteurs photoélectriques à puits quantiques multiples dans lesquels les porteurs sont des trous de la bande de valence. Tel est le cas des matériaux de formule générale Si_xGe_{1-x} dont la compatibilité avec la technologie sur silicium présente l'avantage que les photodétecteurs ainsi obtenus peuvent être intégrés à la plupart des composants électroniques usuels à base de silicium. Pour ce type de système, l'extremum d'énergie de la bande de valence dans la barrière amont doit être inférieur à l'extremum d'énergie de la bande de valence dans la barrière aval.

La description qui va suivre, en regard des dessins annexés donnés à titre d'exemples non limitatifs, fera

bien comprendre en quoi consiste l'invention et comment elle peut être réalisée.

La figure 1 est une vue en coupe d'un détecteur photoélectrique à un puits quantique.

La figure 2 est un diagramme de la structure de bande dans chaque couche du détecteur photoélectrique de la figure 1.

La figure 3 est un premier diagramme de puits quantique sous champ électrique nul.

La figure 4 est un deuxième diagramme de puits quantique sous champ électrique nul.

La figure 5 est un diagramme de fonctionnement sous champ électrique non nul de la structure de puits quantique de la figure 4.

Les figures 6a et 6b sont des diagrammes d'une structure à puits quantiques multiples conforme à l'invention sous champ électrique respectivement nul et non nul.

La figure 7 est un diagramme donnant, sous champ électrique nul, la position des extrema de la bande de conduction pour une première structure selon l'invention à puits quantiques multiples à croisements d'extrema Γ (trait continu) et X (trait pointillé).

La figure 8 est le diagramme de fonctionnement correspondant à la structure de la figure 7.

La figure 9 est un diagramme donnant, sous champ électrique nul, la position des extrema de la bande de conduction pour une deuxième structure selon l'invention, à puits quantiques multiples à croisements d'extrema Γ (trait continu) et X (trait pointillé).

La figure 10 est le diagramme de fonctionnement correspondant à la structure de la figure 9.

La figure 11 est un diagramme de la structure de puits quantique d'un détecteur photoélectrique du type Si(Ge).

La figure 12 est le diagramme de fonctionnement correspondant à la structure de la figure 11.

Les figures 1 à 5 concernent une structure à puits quantique unique et ces figures sont destinées à faciliter la compréhension de l'invention qui porte sur une structure à puits quantiques multiples.

La figure 1 montre, en coupe, une structure de détecteur photoélectrique à un puits quantique unique donnée pour faciliter la compréhension ultérieure de l'invention, constituée par une superposition de trois couches déposées sur un substrat S, par l'intermédiaire d'une première couche C5 de contact électrique, à savoir une couche C1 d'épaisseur L1 en un premier matériau semiconducteur formant une barrière amont B1, une couche intermédiaire C2 d'épaisseur L2 en un deuxième matériau semiconducteur formant le puits P, et une couche C3 d'épaisseur L3 en un troisième matériau semiconducteur formant barrière aval B2. La couche C1 est recouverte d'une deuxième couche C4 de contact électrique.

On a représenté très schématiquement sur la figure 2 la structure de bandes dans chacune des couches C1, C2 et C3, en faisant apparaître les bandes de conduction BC1, BC2 et BC3 et de valence BV1, BV2 et BV3. Dans une telle structure à un seul puits quantique, la composition en matériau semiconducteur est constante dans toute l'épaisseur de chaque couche. Sur le schéma de la figure 2, les bandes de conduction, par exemple, présentent des extrema respectifs, ici des minima, aux centres Γ_1 , Γ_2 et Γ_3 des zones de Brillouin.

Les positions respectives des différentes bandes électroniques dépendent essentiellement de la composition chimique des matériaux semiconducteurs. La conductibilité électrique dans le détecteur photoélectrique ainsi constitué est assurée par la propagation de porteurs de charge donnée, électrons ou trous, dans une bande électronique donnée, bande de conduction ou de valence, dans le sens de la barrière amont B1 à la barrière aval B2.

La figure 3 montre le diagramme d'énergie d'un puits quantique réalisé par les minima Γ_1 , Γ_2 , Γ_3 des bandes de conduction BC1, BC2, BC3, pris au centre de la zone de Brillouin de chaque couche.

Dans le puits de potentiel de la couche C2, le confinement des porteurs produit des niveaux d'énergie quantifiés E_1 , E_2 , ..., E_n , ... dont la valeur est donnée approximativement par

$$E_n = \frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{n\pi}{L_2} \right)^2 \quad n = 1, 2, \dots$$

où \hbar est la constante de Planck normalisée et m la masse des porteurs.

On constate que plus le puits est étroit et plus la différence d'énergie entre les deux premiers niveaux E_1 et E_2 est grande. Il est donc possible d'ajuster les dimensions du puits en fonction de la longueur d'onde de détection désirée.

Les fonctions d'onde ψ_n associées aux niveaux d'énergie E_n sont données en première approximation par :

$$\psi_n = A \sin \left(\frac{n\pi z}{L_2} \right) \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

A étant une constante de normalisation.

Pour peupler en électrons le niveau le plus bas E_1 de la structure du puits quantique, on dope les matériaux semiconducteurs en impuretés qui créent soit un niveau de donneurs E_{d1} au voisinage des bandes de conduction BC1 et BC3 des couches C1 et C3, soit un niveau de donneurs E_{d2} à proximité du niveau fondamental E_1 . Les électrons viennent alors peupler le niveau E_1 . De même, pour peupler en trous les premiers niveaux de la bande de valence, on dopera de manière appropriée les matériaux semiconducteurs par des accepteurs d'électrons.

Sur la figure 3, le niveau d'énergie E_2 correspondant au premier état excité de la structure du puits quantique se trouve confiné à l'intérieur du puits, ce qui a pour conséquence que les porteurs qui s'y trouvent promus à la suite de l'absorption d'un photon d'énergie $h\nu = E_2 - E_1$ ont une probabilité assez faible de se propager et donc de contribuer de façon sensible au signal photoélectrique. De manière à augmenter cette probabilité de propagation, il y a avantage, comme l'indique la figure 4 en champ nul, à réaliser les transitions optiques entre un niveau confiné E_1 du puits et une minibande E_2 d'énergie supérieure à la hauteur de la barrière aval B2.

Dans ce dernier cas, la figure 5 montre le mécanisme de fonctionnement du puits quantique sous un champ électrique non nul. Un photon d'énergie $h\nu$ est absorbé dans le puits quantique par un porteur, un électron par exemple, d'énergie E_1 pour atteindre dans la minibande le niveau d'énergie E_2 . L'électron soumis au champ électrique extérieur appliqué peut alors se propager à travers la structure, mais l'électron circulant dans la minibande a une certaine probabilité, au passage du puits, d'être capturé par la structure pour revenir dans l'état d'énergie minimum E_1 de ce puits.

Dans le but de limiter cette probabilité de capture, la composition des premier et troisième matériaux semiconducteurs est avantageusement telle que, au niveau des barrières B1 et B2, l'énergie du minimum Γ_1 de la bande de conduction BC1 dans la première couche C1 du premier matériau semiconducteur est supérieure à l'énergie du minimum Γ_3 de la bande de conduction BC3 dans la troisième couche C3 du troisième matériau semiconducteur, la différence d'énergie ΔE étant supérieure à l'énergie maximale des phonons longitudinaux optiques dans le deuxième matériau semiconducteur du puits quantique P.

Cette structure de puits quantique dans laquelle les porteurs sont des électrons et la bande électronique concernée la bande de conduction peut être réalisée à l'aide de matériaux semiconducteurs à base d'arséniure de gallium, de formule générale $Ga_xAl_{1-x}As$. En particulier, le premier matériau semiconducteur de la première couche C1 peut avoir pour formule $Ga_{x_1}Al_{1-x_1}As$, le deuxième matériau semiconducteur de la deuxième couche C2 de puits peut être de GaAs, le troisième matériau semiconducteur de la troisième couche C3 ayant pour formule

$$Ga_{x_3}Al_{1-x_3}As,$$

avec

$$x_1 > x_3 \text{ et } x_1 - x_3 > 0,05$$

de manière à avoir une différence d'énergie ΔE entre barrières supérieure à 50 meV, elle-même supérieure à l'énergie des phonons longitudinaux optiques dans GaAs, AlAs et GaAlAs. Typiquement, x_1 et x_3 peuvent valoir 0,25 et 0,2. A titre d'exemple, les épaisseurs des différentes couches peuvent être : $L_1 = L_3 = 0,1 \mu m$ et $L_2 = 6 nm$.

On a représenté sur les figures 6a et 6b une structure à puits quantiques multiples conforme à l'invention. Cette structure est formée d'un empilement alterné de couches du deuxième matériau semiconducteur de puits, GaAs par exemple, séparées par des couches d'un matériau semiconducteur présentant, de la barrière aval B2 d'un puits P à la barrière amont B1 du puits suivant P', dans le sens de propagation des porteurs, une composition chimique variant graduellement entre la composition du troisième matériau semiconducteur, $Ga_{x_3}Al_{1-x_3}As$ par exemple, à celle du premier matériau semiconducteur, $Ga_{x_1}Al_{1-x_1}As$ par exemple, avec $x_1 > x_3$.

On remarquera que dans le schéma de structure de la figure 3 où le niveau photoexcité E_2 est un état confiné dans le puits quantique, la transition $E_1 \rightarrow E_2$ présente une force d'oscillateur relativement élevée du fait du recouvrement important entre les fonctions d'ondes correspondantes. Par contre, le confinement de l'état excité E_2 a pour effet de limiter la probabilité, pour l'électron dans l'état excité E_2 , de quitter le puits et de participer au courant. A l'inverse, la structure montrée sur la figure 4 est plus avantageuse quant à cette probabilité, mais l'étalement de la fonction d'onde est tel que la force d'oscillateur de la transition optique est plus faible.

Aussi, la variante de réalisation de l'invention illustrée aux figures 7 et 8 a pour but, à la fois, d'améliorer la conductibilité électrique et d'augmenter le recouvrement des fonctions d'onde des états actifs optiquement. A cet effet, l'invention propose de confiner la fonction d'onde de l'état d'énergie E_2 , mais d'autoriser le départ des porteurs photocréés grâce à la présence de niveaux d'énergie accessibles correspondant à un extremum, ici un minimum en bord de zone de Brillouin.

La structure de la figure 7 comporte une couche de puits quantique en $\text{Ga}_{0,9}\text{Al}_{0,1}\text{As}$ par exemple, entourée de part et d'autre d'une couche d'un matériau semiconducteur dont la composition varie graduellement, dans le sens de la conduction, de AlAs correspondant audit troisième matériau semiconducteur, à $\text{Ga}_{0,7}\text{Al}_{0,3}\text{As}$ par exemple, correspondant audit premier matériau semiconducteur, ces compositions pouvant bien entendu varier à condition toutefois que le minimum Γ de la bande de conduction au centre de la zone de Brillouin dans le premier matériau soit supérieur au minimum X de la bande de conduction en bord de zone de Brillouin dans le troisième matériau, la différence d'énergie ΔE entre ces deux minima devant être supérieure à l'énergie maximale des phonons longitudinaux optiques dans GaAs . Pour une largeur de 9 nm et une composition de $\text{Ga}_{0,9}\text{Al}_{0,1}\text{As}$ du puits, le détecteur fonctionne au voisinage de $2,7 \times 10^{13} \text{ Hz}$.

Le mécanisme du fonctionnement sous champ électrique d'un détecteur photoélectrique de ce type est illustré sur la figure 8. La transition optique entre les états confinés E_1 et E_2 est effectuée avec une force d'oscillateur importante. Le photoélectron ainsi créé se propage dans le puits jusqu'à la barrière aval B2 et pénètre dans le troisième matériau où, par désexcitation non radiative, il rejoint le niveau X_3 d'énergie minimale dans lequel il se maintient durant toute sa propagation dans la couche de matériau à composition graduellement variable jusqu'à croiser un minimum de la bande de conduction en centre de zone de Brillouin. L'électron continue alors sa trajectoire dans ce type d'état et atteint la barrière amont B1 où se produit le saut quantique au-dessus du puits entre le niveau en Γ du premier matériau semiconducteur et le niveau en X du troisième matériau semiconducteur.

Les figures 9 et 10 montrent un détecteur photoélectrique, de structure analogue à celle décrit en regard des figures 7 et 8, dont la responsivité a été étendue à la gamme $5 \times 10^{13} - 10^{14} \text{ Hz}$. Le puits quantique proprement dit est réalisé par une couche de GaAs entouré de deux couches dont la composition varie graduellement d'un troisième matériau semiconducteur de composition $\text{Ga}_{0,2}\text{Al}_{0,8}\text{As}$ à un premier matériau semiconducteur de composition $\text{Ga}_{0,4}\text{Al}_{0,6}\text{As}$, par exemple. Dans ce type de structure, il importe que le minimum X de la bande de conduction en bord de zone de Brillouin dans le premier matériau soit supérieur au minimum X de la bande de conduction en bord de zone de Brillouin dans le troisième matériau, la différence d'énergie ΔE entre ces deux minima devant être supérieure à l'énergie maximale des phonons longitudinaux optiques dans GaAs . Pour un puits de GaAs de 3 nm, le détecteur fonctionne au voisinage du 10^{14} Hz .

Comme le montre la figure 10, lors du fonctionnement du photodétecteur, un électron, promu dans le niveau d'énergie E_2 par absorption d'un photon de la gamme $5 \times 10^{13} - 10^{14} \text{ Hz}$ se désexcite pour atteindre le minimum en X du troisième matériau semiconducteur et se propage dans la couche de composition variable jusqu'à la barrière amont B1 où il se trouve alors au minimum en X du premier matériau semiconducteur. Le passage d'un niveau X à l'autre à travers le puits quantique est effectué, conformément aux dispositions de la présente invention, par saut de potentiel.

Entre le système GaAs/GaAlAs , l'invention s'applique également à d'autres systèmes de composés III-V comme

GaInAs/GaAlInAs , GaInAs/GaInAsP , GaSb/GaAlSb .

L'invention peut également s'appliquer à des photodétecteurs utilisant les trous de la bande de valence comme porteurs majoritaires. Il a en effet été démontré que les détecteurs photoélectriques à puits quantiques basés sur ce principe présentaient de bonnes détectivités. Leur intérêt essentiel est de permettre une mise en oeuvre du photodétecteur sous incidence normale : en effet, la transition intra-bande de valence entre le premier niveau E_1 de trous lourds et le second niveau E_2 est permise dans cette configuration.

Le problème essentiel d'une telle structure est le faible gain dû à la lente vitesse de dérive des trous. Ils ont en conséquence 80 à 100 % de chances d'être capturés au passage d'un seul puits. Une structure conforme à l'invention doit permettre de réduire cette probabilité de capture comme dans le cas des électrons. Les figures 11 et 12 montrent une structure de ce type qui permet une détection au voisinage de $2,7 \times 10^{13} \text{ Hz}$ pour des matériaux semiconducteurs de forme générale $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$.

Dans cet exemple, le premier matériau semiconducteur formant la barrière amont B1 est une couche de silicium pur ($x=0$). Le puits quantique P proprement dit est constitué par une couche de $0,004 \mu\text{m}$ d'épaisseur d'un deuxième matériau semiconducteur de formule $\text{Si}_{0,7}\text{Ge}_{0,3}$. Enfin, la structure est complétée par une troisième couche présentant une composition variant graduellement de celle d'un troisième matériau semiconducteur de formule $\text{Si}_{0,94}\text{Ge}_{0,06}$ au niveau de la barrière aval B2, à celle du silicium pur.

Le diagramme d'énergie représenté aux figures 11 et 12 est tracé en prenant pour référence les maxima des bandes de valence au centre des zones de Brillouin pour chacun des matériaux semiconducteurs considérés. La différence d'énergie ΔE entre ces maxima pour les premier et troisième matériaux est de 60 meV, valeur supérieure à l'énergie maximale des phonons longitudinaux optiques du silicium qui est de 57 meV.

La transition entre l'état confiné E_1 et l'état résonant E_2 au bord du puits s'effectue autour de la fréquence de $2,7 \times 10^{13} \text{ Hz}$.

Ce cas particulier de structure de détecteur photoélectrique à puits quantiques est particulièrement im-

portant car elle permet a priori une intégration facile avec une électronique de commande et de traitement VLSI.

R v ndicati ns

1. Détecteur photoélectrique présentant une structure à puits quantiques multiples constitués chacun par une barrière amont (B1) réalisée en un premier matériau semiconducteur, un puits (P) réalisé en un deuxième matériau semiconducteur, et une barrière aval (B2) réalisée en un troisième matériau semiconducteur, chaque matériau semiconducteur étant défini par sa composition chimique, et la conductibilité électrique dans le détecteur étant assurée par propagation, dans le sens allant de la barrière amont à la barrière aval, de porteurs de charge donnée dans une bande électronique de type donné présentant, dans chacun desdits matériaux, un extremum d'énergie, caractérisé en ce que, lesdits matériaux semiconducteurs étant au moins partiellement dopés en porteurs, les premier et troisième matériaux semiconducteurs ont une composition chimique telle que la différence (ΔE) d'énergie, au niveau desdites barrières (B1, B2), entre l'extremum d'énergie de ladite bande électronique dans le premier matériau semiconducteur et l'extremum d'énergie de ladite bande électronique dans le troisième matériau semiconducteur est supérieure en valeur absolue à l'énergie maximale des phonons longitudinaux optiques dans le deuxième matériau semiconducteur constituant le puits (P), et en ce que ladite structure est formée d'un empilement alterné de couches du deuxième matériau semiconducteur séparées par des couches d'un matériau semiconducteur présentant, de la barrière aval (B2) d'un puits (P) à la barrière amont (B1) du puits (P) suivant dans le sens de propagation des porteurs, une composition chimique variant graduellement de la composition du troisième matériau semiconducteur à celle du premier matériau semiconducteur.
2. Détecteur photoélectrique selon la revendication 1, caractérisé en ce que, lesdits matériaux semiconducteurs étant au moins partiellement dopés en donneurs, lesdits porteurs sont des électrons et ladite bande électronique la bande de conduction.
3. Détecteur photoélectrique selon la revendication 2, caractérisé en ce que ledit extremum d'énergie de ladite bande électronique dans ledit premier matériau semiconducteur est le minimum (Γ_1) de la bande de conduction au centre de la zone de Brillouin, et en ce que ledit extremum de ladite bande électronique dans ledit troisième matériau est le minimum (Γ_3) de la bande de conduction au centre de la zone de Brillouin.
4. Détecteur photoélectrique selon la revendication 2, caractérisé en ce que ledit extremum d'énergie de ladite bande électronique dans ledit premier matériau semiconducteur est le minimum (Γ_1) de la bande de conduction au centre de la zone de Brillouin, et en ce que ledit extremum d'énergie de ladite bande électronique dans ledit troisième matériau semiconducteur est le minimum (X) de la bande de conduction en bord de zone de Brillouin.
5. Détecteur photoélectrique selon la revendication 2, caractérisé en ce que ledit extremum d'énergie de ladite bande électronique dans ledit premier matériau semiconducteur est le minimum (X) de la bande de conduction en bord de zone de Brillouin, et en ce que ledit extremum d'énergie de ladite bande électronique dans ledit troisième matériau semiconducteur est le minimum (X) de la bande de conduction en bord de zone de Brillouin.
6. Détecteur photoélectrique selon la revendication 1, caractérisé en ce que, lesdits matériaux semiconducteurs étant au moins partiellement dopés en accepteurs, lesdits porteurs sont des trous et ladite bande électronique la bande de valence.
7. Détecteur photoélectrique selon la revendication 6, caractérisé en ce que ledit extremum d'énergie de ladite bande électronique dans ledit premier matériau semiconducteur est le maximum de la bande de valence au centre de la zone de Brillouin, et en ce que ledit extremum d'énergie de ladite bande électronique dans ledit troisième matériau est le maximum de la bande de valence au centre de la zone de Brillouin.
8. Détecteur photoélectrique selon l'une quelconque des revendications 2 à 7, caractérisé en ce que lesdits matériaux semiconducteurs sont des composés des éléments des colonnes III et V de la classification périodique des éléments.
9. Détecteur photoélectrique selon la revendication 8, caractérisé en ce que lesdits matériaux semiconduc-

teurs répondent à la formule chimique générale de $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$.

10. Détecteur photoélectrique selon l'une des revendications 6 ou 7, caractérisé en ce que lesdits matériaux semiconducteurs répondent à la formule chimique générale $\text{Si}_x\text{Ge}_{1-x}$.

5

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

FIG. 1

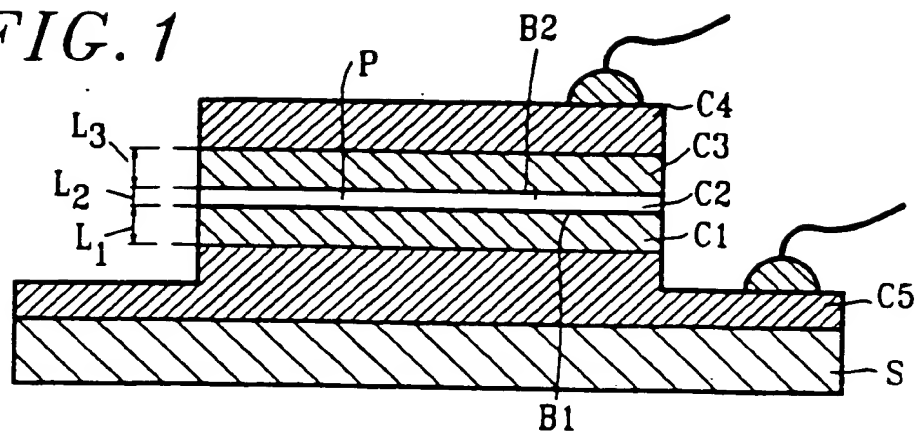


FIG. 2

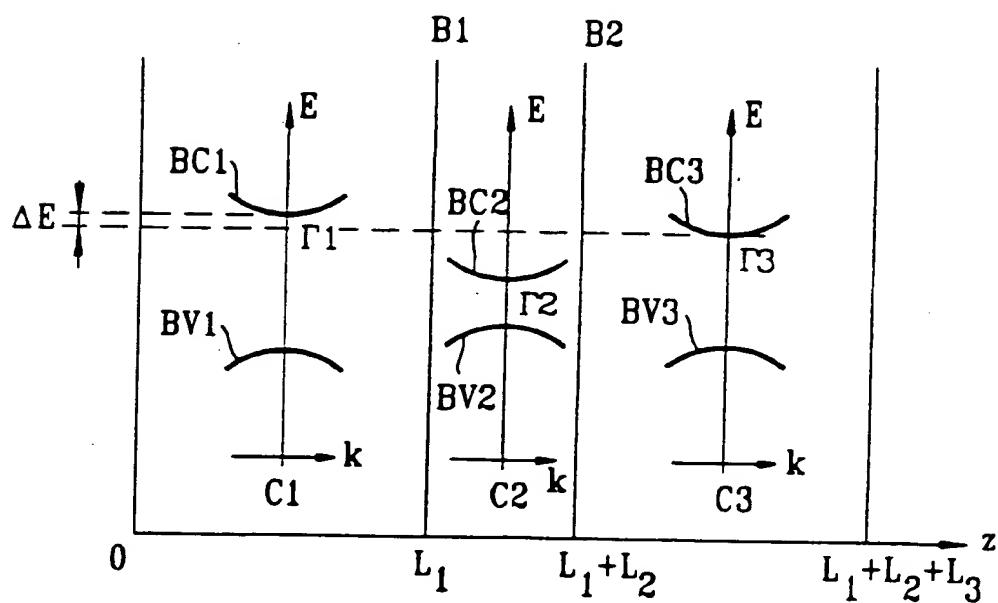


FIG. 3

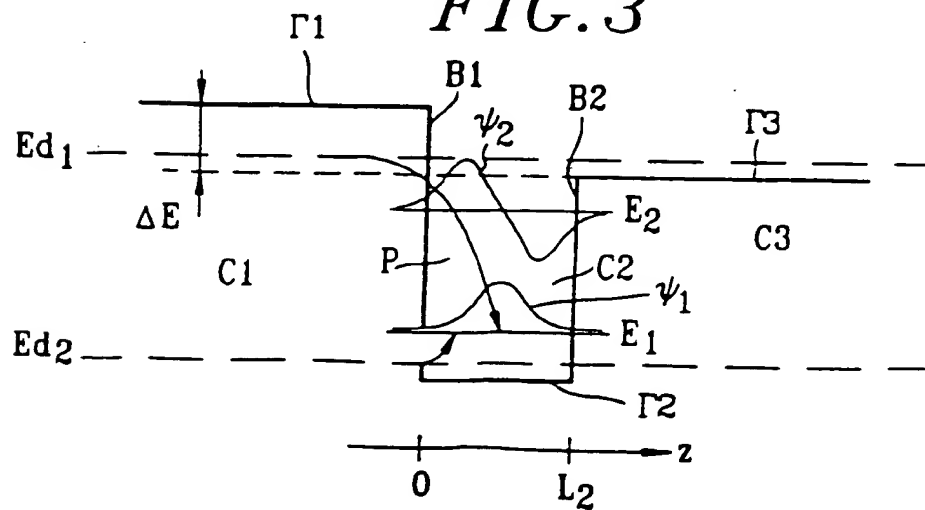


FIG. 4

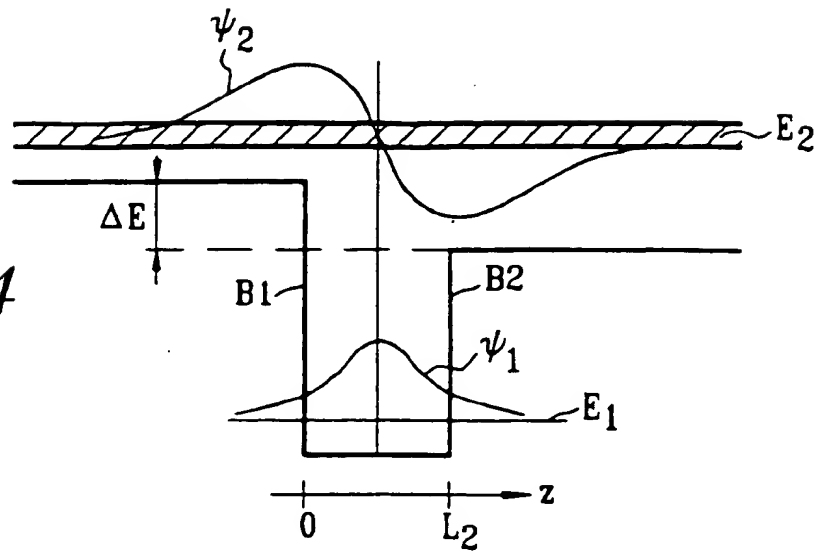


FIG. 5

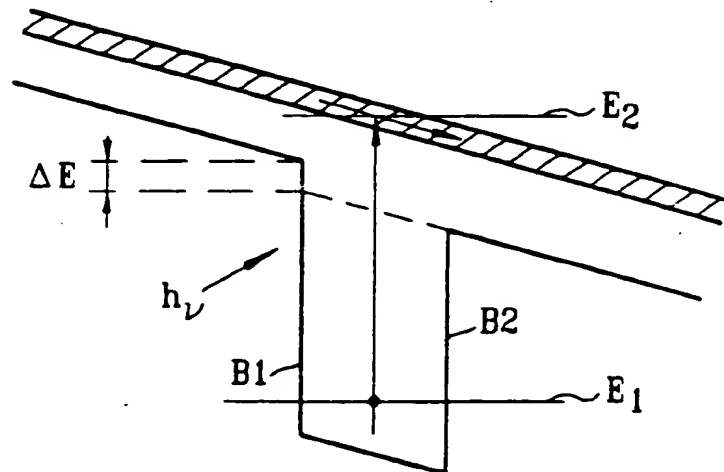
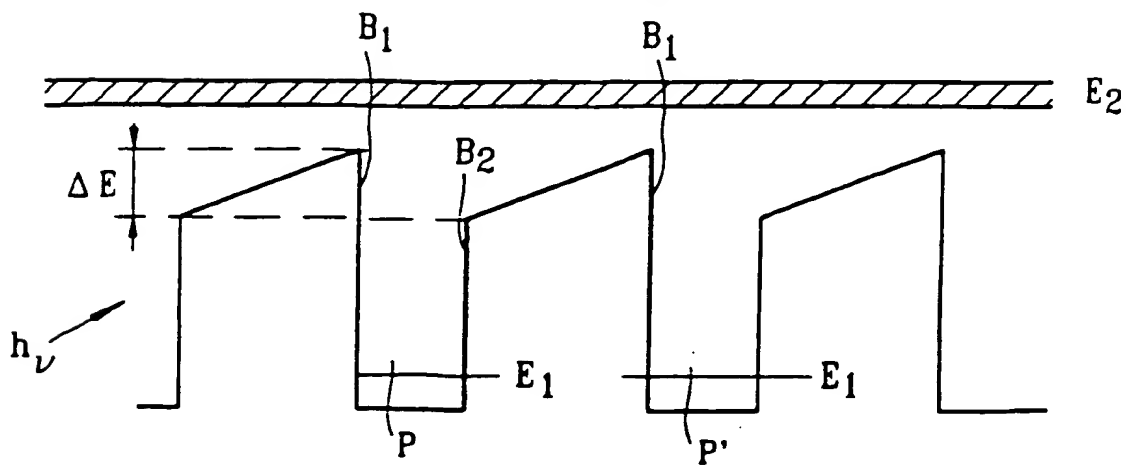


FIG. 6a



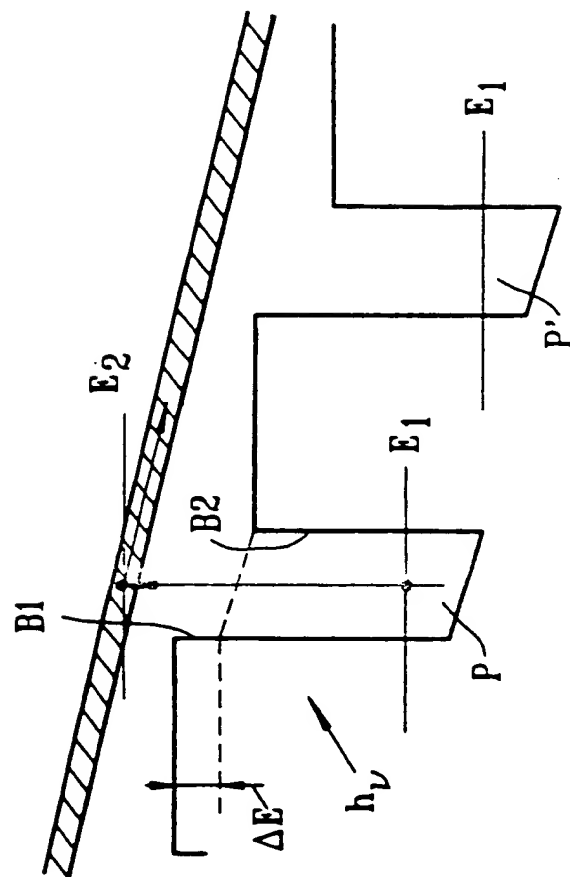


FIG. 6b

FIG. 7

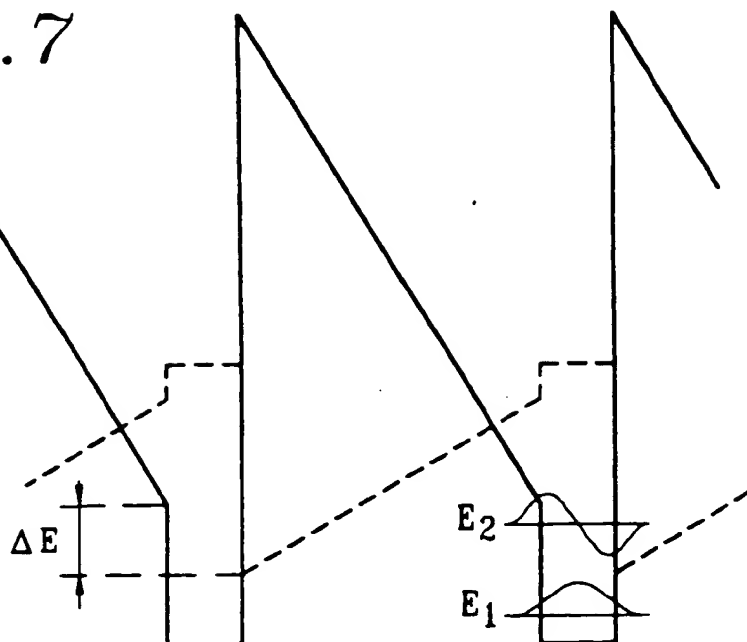


FIG. 8

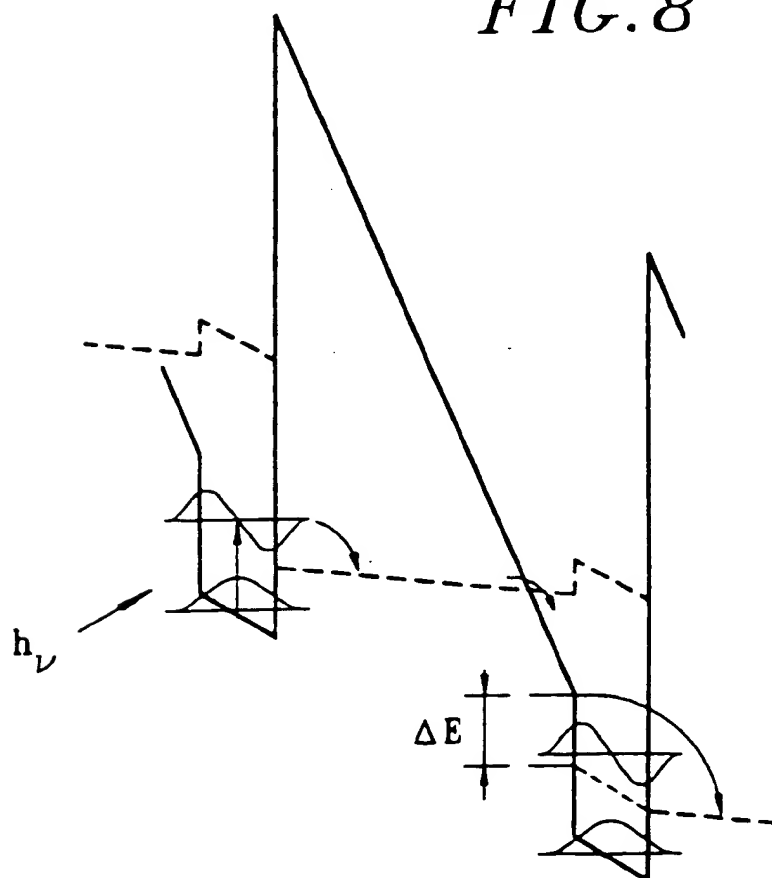


FIG. 9

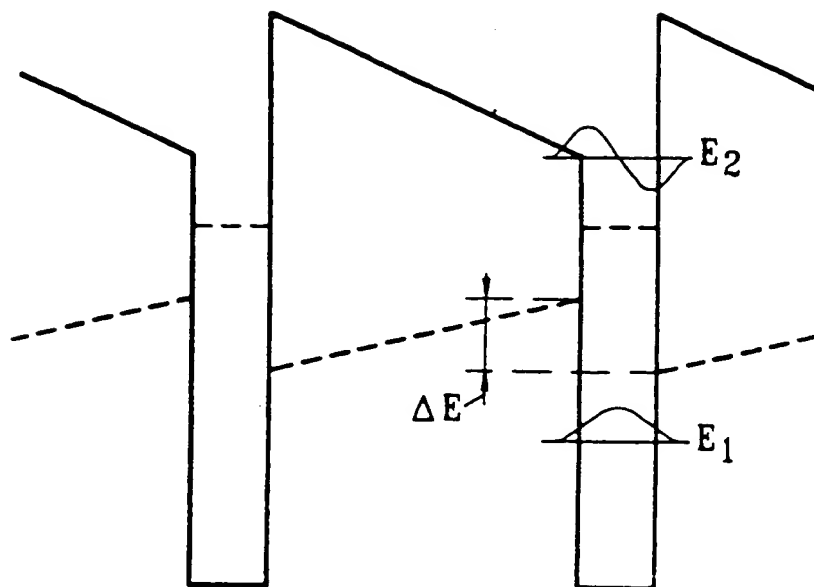


FIG. 10

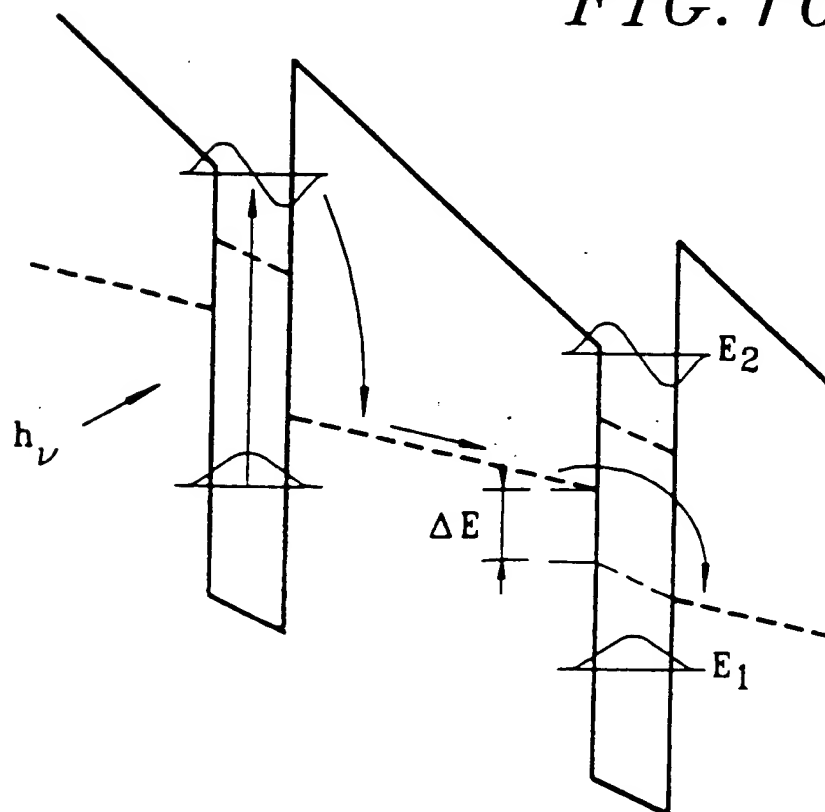


FIG. 11

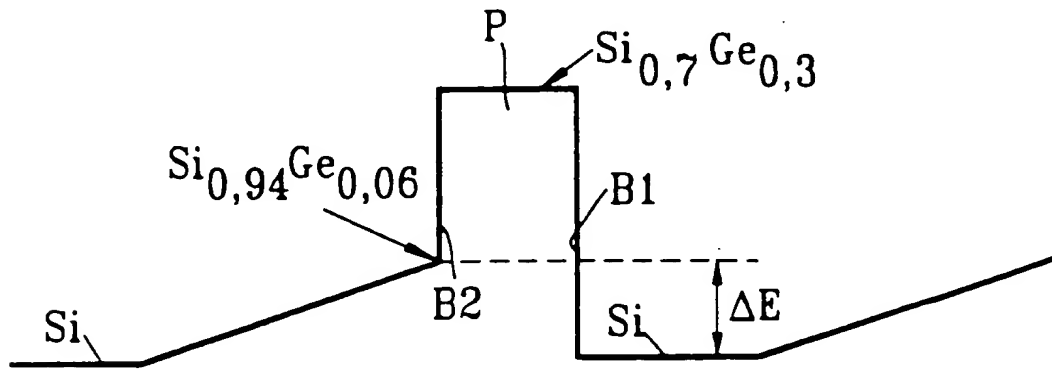
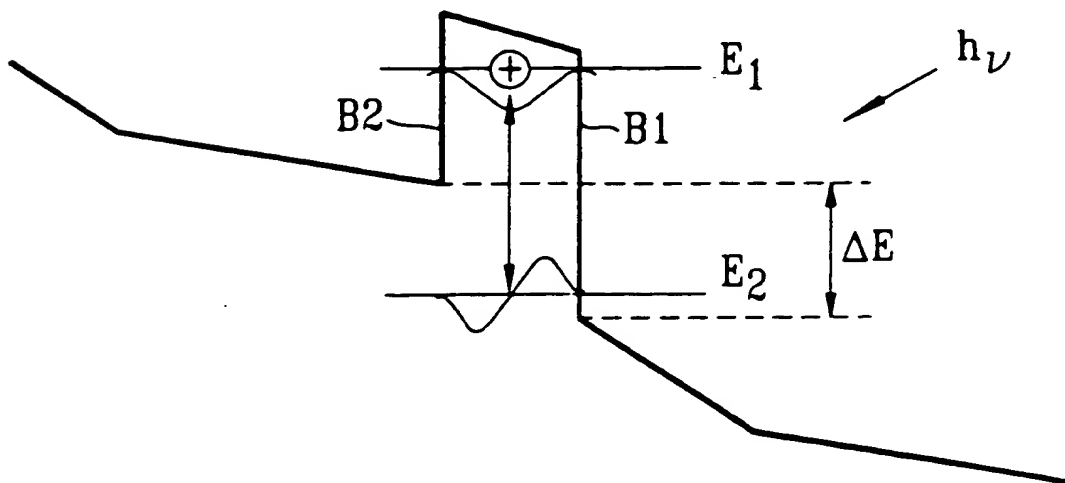


FIG. 12





Office européen
des brevets

RAPPORT DE RECHERCHE EUROPEENNE

Numero de la demande

EP 93 40 0392

DOCUMENTS CONSIDERES COMME PERTINENTS			
Catégorie	Citation du document avec indication, en cas de besoin, des parties pertinentes	Revendication concernée	CLASSEMENT DE LA DEMANDE (Int. Cl.5)
A	APPLIED PHYSICS LETTERS. vol. 45, no. 6, 15 Septembre 1984, NEW YORK US pages 649 - 651 COON ET AL. 'NEW MODE OF IR DETECTION USING QUANTUM WELLS' * figure 1 *	1,2,8,9	H01L31/0352
A	EP-A-0 463 907 (THOMSON-CSF) * colonne 6, ligne 14 - colonne 8, ligne 44; figure 4A *	1,2,8,9	
A	US-A-4 873 555 (COON ET AL.) * colonne 3, ligne 9 - ligne 47; figure 2 *	1,2,8,9	
A	PHYSICAL REVIEW LETTERS vol. 67, no. 16, 14 Octobre 1991, NEW YORK US pages 2231 - 2234 C.T.LIU ET AL. 'STEADY-STATE PHOTOVOLTAIC EFFECT IN ASYMMETRICAL GRADED SUPERLATTICES' * le document en entier *	1	
A,D	APPLIED PHYSICS LETTERS. vol. 57, no. 4, 23 Juillet 1990, NEW YORK US pages 383 - 385 LEVINE ET AL. 'TUNABLE LONG-WAVELENGTH DETECTORS USING GRADED BARRIER QUANTUM WELLS GROWN BY ELECTRON BEAM SOURCE MOLECULAR BEAM EPITAXY' * le document en entier *	1	
Le présent rapport a été établi pour toutes les revendications			DOMAINES TECHNIQUES RECHERCHES (Int. Cl.5)
			H01L
Lieu de la recherche LA HAYE		Date d'achèvement de la recherche 17 MAI 1993	Examinateur LINA F.
CATEGORIE DES DOCUMENTS CITES X : particulièrement pertinent à lui seul Y : particulièrement pertinent en combinaison avec un autre document de la même catégorie A : arrière-plan technologique O : divulgation non-écrite P : document intercalaire		T : théorie ou principe à la base de l'invention E : document de brevet antérieur, mais publié à la date de dépôt ou après cette date D : cité dans la demande L : cité pour d'autres raisons & : membre de la même famille, document correspondant	

EPO FORM 1503 01.92 (P0002)